

Элементарная теория измерительного кабеля при резистивном методе измерения скорости детонации взрывчатых веществ

Сергей Васильевич ИЛЯХИН¹,
Илья Юрьевич МАСЛОВ²,
Павел Александрович БРАГИН²

¹Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), Россия, Москва

²ООО «Глобал Майнинг Эксплозив - Раша», Московская обл., г. Наро-Фоминск, пос. Селятино

Актуальность темы, цель и методы исследования. В настоящее время для измерения скорости детонации во взрывчатых веществах в промышленных и лабораторно-полигонных условиях широко применяются рефлектометрический и резистивный методы. В основе указанных методов лежит фиксация соответствующим измерительным прибором изменения длины неповрежденного линейного датчика при распространении по заряду детонационной волны. Датчик представляет собой специальный кабель и располагается по длине заряда ВВ при подготовке заряда к взрыву. При резистивном методе прибор измеряет и записывает величину электрического сопротивления кабеля, уменьшающегося по мере распространения детонационной волны. При этом исходят из представления, что кабель практически мгновенно разрушается, а электропроводящие в зоне химических реакций детонационной волны продукты детонации замыкают проводящие элементы кабеля. Однако практически мгновенное разрушение измерительного кабеля возможно только при достаточно высоком детонационном давлении. При давлениях, недостаточных для быстрого разрушения кабеля, возникает вопрос о возможности использования указанного метода для измерения скорости детонационной (ударной) волны.

Результаты и выводы. Показано, что инструментальный комплект, применяемый при резистивном методе измерения скорости детонации взрывчатых веществ, можно использовать для измерения скорости распространения относительно слабых детонационных волн в ВВ и ударных волн в пассивных конденсированных средах. Получены ограничения на величину фронтального давления во фронте детонационной волны в ВВ или во фронте ударной волны в пассивных средах и время действия ударного импульса, при выполнении которых указанный метод позволяет получать корректные результаты.

Ключевые слова: рефлектометрический метод, резистивный метод, измерительный кабель, вязко-пластичное разрушение оболочек кабеля, давление во фронте ударной волны, длительность ударного импульса.

Введение
В настоящее время измерение скорости детонации во взрывчатых веществах в промышленных и лабораторно-полигонных условиях осуществляется преимущественно рефлектометрическим [1–7] или резистивным [7–12] методами.

В обоих методах по заряду располагают непрерывный линейный датчик в виде специального (для каждого метода) коаксиального измерительного кабеля, который присоединяется к соответствующему измерительному прибору.

При рефлектометрическом методе прибор посылает в кабель короткие импульсные сигналы, которые отражаются от его противоположного конца кабеля. Измеряется и записывается время задержки между посланным и принятым импульсами, которое пропорционально длине кабеля. При этом независимо от величины проводимости вещества в детонационной волне или фронте горения и независимо от состояния конца кабеля (обрыв, хорошее или плохое замыкание или даже просто смятие без разрушения кабеля) происходит надежное отражение сигнала от места деформирования (разрушения) кабеля при воздействии на него. Это дает возможность измерять как быстрые, так и медленные детонационные процессы, а также горение, вплоть до таких низких скоростей, как 500 м/с и менее [1–7].

При резистивном методе прибор измеряет и записывает величину электрического сопротивления кабеля, уменьшающегося по мере распространения детонационной волны [7–12]. При этом исходят из представления, что кабель практически мгновенно разрушается, а электропроводящие в зоне химических реакций детонационной волны продукты детонации [13, 14] замыкают проводящие элементы кабеля.

Оба метода обеспечивают непрерывные измерения скорости разрушения кабеля в промышленных условиях.

Исторически первым появился и получил широкое распространение резистивный метод, который зарекомендовал себя надежным и достаточно точным методом измерений скорости детонации ВВ в промышленных и полигонных условиях при высоких параметрах детонационного процесса. Однако в случае низкоскоростных режимов взрывчатого разложения ВВ возникает вопрос о приемлемости схемы мгновенного разрушения кабеля и замыкания его проводящих элементов продуктами детонации, так как давление и температура в продуктах взрывчатого разложения существенно уступают данным показателям высокоскоростного детонационного процесса. В рекламных проспектах и сопроводительной к резисторному прибору документации отсутствуют данные о минимальных параметрах детонационного процесса, которые способен зафиксировать прибор. Это вызывает затруднения в работе экспертных и исследовательских организаций, использующих резистивный метод измерения скорости детонации.

В настоящей работе осуществлена теоретическая оценка возможности применения резистивного метода измерений в зависимости от параметров детонационной (ударной) волны, что актуально для экспертных и исследовательских организаций, имеющих соответствующее оборудование.

Материалы и результаты исследований.

При резистивном методе измерения скорости детонации ВВ используется специальный измерительный кабель, проложенный вдоль заряда. Конструкция измерительного кабеля представлена на рис. 1.

При обосновании возможности замеров скорости детонационной волны с использованием измерительных кабелей представленного типа исходят из следующей качественной картины явления:

- изоляционные оболочки кабеля разрушаются в зоне химических реакций детонационной волны;
- продукты детонации в зоне химических реакций имеют высокую электропроводимость [13, 14];

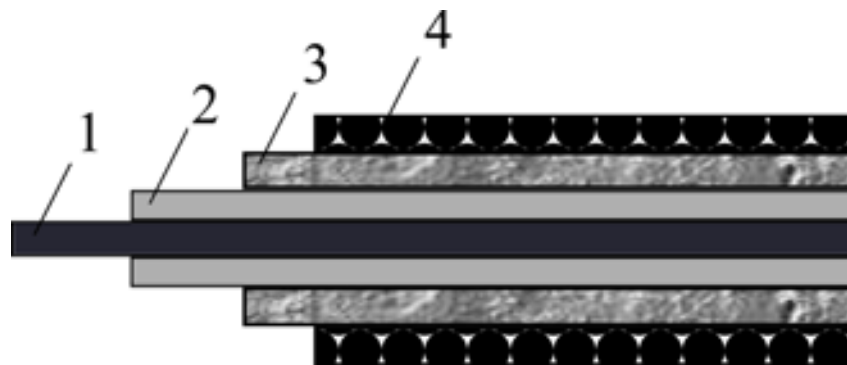


Рисунок 1. Конструкция измерительного кабеля. 1 – центральный металлический провод; 2 – внутренняя изоляционная оболочка; 3 – оболочка из тонких сплетенных металлических проволочек; 4 – внешняя изоляционная оболочка.

Figure 1. Measuring cable design. 1– central metal wire; 2 – inner insulating sheath; 3 – the shell of thin woven metal wires; 4 – external insulating sheath.

– центральный провод (1) и оболочка из сплетенных металлических проволочек (3) замыкаются между собой электропроводящими продуктами взрыва (рис. 1) [7–12].

Рассмотрим измерительный кабель марки «Probecable» (рис. 1).

Внешние и внутренние изоляционные оболочки кабеля изготовлены из блок-сополимеров пропилена и этилена. Молекулы пропилена в структуре молекулы рассматриваемого полимера придают ему прочность и термостойкость, а молекулы этилена – эластичность и снижают температуру стеклования полимера измерительного кабеля. Изменением соотношения между длиной (и количеством) цепочек полипропилена и полиэтилена в структуре макромолекул полимеров добиваются необходимых физико-механических свойств материалов оболочек. Расчеты на основании [15] показали, что данный пластик вследствие сжатия под действием ударной волны нагревается до температуры больше, чем его температура спинодали, если давление в ударной волне, воздействующей на рассматриваемый пластик, больше 7 ГПа (температура спинодали – это температура, при которой происходит взрывоподобное вскипание пластика, сопровождающееся разлетом мельчайших капель, на которые диспергирует пластик. Для полимеров, имеющих полиэтиленовую основу, температуры спинодали составляет примерно 800 К [16]).

Однако при низкоскоростных режимах детонации давление в зоне реакции составляет 1,2–3,5 ГПа [17]. Следовательно, представления о практически мгновенном разрушении изоляционных оболочек под действием детонационного давления с последующим замыканием проводящих элементов кабеля ионизированными продуктами детонации в случае измерений низкоскоростных режимов детонации некорректны.

Рассмотрим деформирование измерительного кабеля при давлениях ниже 7 ГПа.

Полагаем, что деформация материалов изоляционных оболочек описывается законом Бингама, так как согласно исследованиям [15, 18] при ударном воздействии на полимеры, имеющие полиэтиленовую основу, их разрушение при температурах ниже температуры спинодали происходит вязко-пластичным образом.

Введем следующие обозначения (численные данные соответствуют измерительному кабелю марки «Probecable»):

$R_{н.в}$ – наружный радиус внешней изоляционной оболочки, $R_{н.в} = 0,9$ мм;

R_1 – внутренний радиус внешней изоляционной оболочки, $R_1 = 0,65$ мм;

r_1 – наружный радиус внутренней изоляционной оболочки, $r_1 = 0,4$ мм;

$r_{ж}$ – радиус центрального металлического провода, $r_{ж} = 0,2$ мм;

$R_{пр}$ – радиус металлической проволочки из коаксиальной сетчатой оплетки, $R_{пр} = 0,025$ мм;

n – количество металлических проволочек в коаксиальной сетчатой оплетке, $n = 48$;

τ_1, τ_2 – характерное предельное напряжение сдвига, при достижении которого начинается течение материала внешней и внутренней изоляционных оболочек соответственно;

μ_1, μ_2 – динамический коэффициент структурной (пластической) вязкости материала внешней и внутренней изоляционных оболочек соответственно;

P – величина внешнего давления, обжимающего измерительный кабель;

t_* – время действия внешнего давления.

Микроскопическое изучение коаксиальной сетчатой оплетки показало:

– сеть из металлических проволочек сплетена так, что толщина области пучности (область пересечения нескольких прядей проволочек) $h = 0,25$ мм;

– плетение осуществлено таким образом, что в нем образованы сквозные отверстия, имеющие форму, подобную усеченной четырехугольной пирамиде;

– верх усеченной пирамиды обращен в сторону внутренней изоляционной оболочки;

– начальный эффективный радиус отверстия равен: со стороны внешней оболочки – $a_1 = 0,5$ мм; со стороны внутренней изоляционной оболочки – $a_1 = 0,34$ мм;

N_L – линейная плотность отверстий, $N_L = 3600$ отв/м.

Принимаем следующую качественную картину замыкания проводящих элементов измерительного кабеля под действием всесторонне обжимающего ударного воздействия.

Под действием внешнего давления происходит сжатие наружной изолирующей оболочки, которое передается металлической сетке. В узлах пучности сжатие практически сразу передается внутренней изолирующей оболочке. Сетка, с

одной стороны, внедряется во внутреннюю изолирующую оболочку, а с другой – материал внешней оболочки начинает втекать в свободное сеточное пространство. Для соприкосновения сетки с центральным проводом необходимо, чтобы сетка углубилась во внутреннюю оболочку на глубину

$$h_2 = r_1 - r_{*} \quad (1)$$

При этом глубина проникновения материала внешней оболочки в сетку h_1 должна удовлетворять условию:

$$h_1 < R_1 - r_1 - h_2 \quad (2)$$

Согласно формуле Бекингема [19], секундный объемный расход $Q(a, h)$ вязко-пластичного вещества через цилиндрический канал равен

$$Q(a, h) = \frac{\pi a^4 P}{8\mu h} \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2\tau h}{aP} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau h}{aP} \right)^4 \right), \quad (3)$$

где a, h – эффективный радиус и длина канала соответственно.

Объем материала внутренней изолирующей оболочки, приходящийся на одно отверстие, равен

$$V_p = \frac{\pi(r_1^2 - r_{*}^2)}{N_L} \quad (4)$$

Время истечения объема материала V_p через отверстие равно

$$t_* = \frac{V_p}{Q(a_2, h_2)} \quad (5)$$

На основании (1), (3)–(5), учитывая значения параметров, определяем

$$t_* \cong \frac{4\mu_2}{P} \quad (6)$$

Из (6) определяем ограничения на величину внешнего давления и величину ударного импульса

$$P \geq \frac{4\mu_2}{t_\delta} \text{ и } Pt_\delta \geq 4\mu_2.$$

Например, при $\mu_2 \approx 1000 \text{ Па} \times \text{с}$ и $t_\delta \cong 10^{-5} \text{ с}$: $P \geq 0,4 \text{ ГПа}$.

Дополнительно на основании (2)–(5) находим ограничение на величины μ_1 и τ_1 : $\mu_1 > 70 \mu_2$ и $\tau_1 > \tau_2$.

Последнее достигается регулированием физико-механических свойств блок-сополимеров, из которых изготавливаются оболочки измерительного кабеля.

Выводы.

Предложена элементарная теория измерительного кабеля при резистивном методе измерения скорости детонации ВВ.

Показано, что резистивный метод измерения скорости детонации взрывчатых веществ можно использовать при измерении скорости распространения слабых детонационных волн в ВВ и ударных волн в пассивных средах в случае, если величина ударного импульса, воздействующего на кабель будет больше учетверенного значения коэффициента динамической вязкости материала внутренней изоляционной оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

- Kittell D. E., Mares J. O., Son J. F., Son S. F. Using time-frequency analysis to determine time-resolved detonation velocity with microwave interferometry // Review of scientific instruments. 2015. Vol. 86, № 4. P. 1–10. 044705. <https://doi.org/10.1063/1.4916733>
- Rae P. Determination velocity of detonation using high-resolution time domain reflectometry // Review of Scientific Instruments. 2019. Vol. 90, № 8. 085005. <https://doi.org/10.1063/1.5100750>
- Lee Chun-Kwon, Gu-Young Kwon, Lee Yeong, Lee Geon, Bang Su, Shin Yong-June. Insulation Characteristics and Fault Analysis of HTS Cable via Stepped Frequency Waveform Reflectometry // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2019. № 3. P. 99.
- Rodriguez G., Gilbertson S. M. Ultrafast fiber Bragg grating interrogation for sensing in detonation and shock wave experiments // Sensors. 2017. Vol. 17, № 1. P. 27.
- Сапронов Е. М., Бердов С. П., Белин В. А., Астахов Е. О. Повышение эффективности отбойки горной породы на основе исследования скорости детонации ЭВВ рефлектометрическим методом // Горный журнал. 2012. № 9 (спец. вып.). С. 46–50.
- Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ рефлектометрическим методом с использованием измерителя скорости детонации SpeedVOD. СТО 01.01.004–2013. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2013. 21 с.
- Кутуев В. Ф., Меньшиков П. В., Жариков С. Н. Анализ методов исследования детонационных процессов ВВ // Проблемы недропользования. 2016. № 3. С. 78–87.
- Маслов И. Ю., Пупков В. В., Кампель Ф. Б. и др. Определение фактической скорости детонации и работоспособности новых эмульсионных ВВ с целью выбора рациональной плотности заряжения при взрывоподготовке железных руд // ГИАБ. 2003. № 5. С. 56–60.
- Маслов И. Ю., Пупков В. В., Кампель Ф. П. и др. Метод непрерывного измерения скорости детонации зарядов промышленных ВВ // Взрывное дело. 2006. № 96/53. С. 101–113.
- Добрынин И. А. Методика измерения скорости детонации ПВВ в скважинных зарядах с применением современных датчиков // ГИАБ. 2007. ОВ № 8. С. 27–33.

11. Котяшев А. А., Маторин А. С., Меньшиков П. В. Определение характеристик эмульсионных взрывчатых веществ методом производственного эксперимента // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Чтения памяти В. Р. Кубачека: сб. докл. VII Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2009. С. 58–63.
12. Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом с использованием измерителя скорости детонации VOD Mate CTO 01.01.004-2011. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2011. 17 с.
13. Ershov A. P., Satonkina N. P., Ivanov G. M. et al. Reaction zones and conductive zones in dense explosives // Proc. of 13th International Detonation Symposium 351-07-01. Norfolk, VA, 2006. Office of Naval Research. Arlington, VA. P. 79–88.
14. Сатонкина Н. П., Прууэл Э. Р., Ершов А. П. и др. Эволюция электропроводности эмульсионных ВВ при их детонационном превращении // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 3. С. 91–97.
15. Кунижев Б. И., Цечоева А. Х., Кушхатлоков С. Л., Кадыкоева М. Х. Ударная адиабата и оценка температуры ударно-сжатого полиэтилена // Научные известия. 2015. № 1. С. 89–93.
16. Хищенко К. В., Ломоносов И. В., Фортов В. Е., Шленский О. Ф. Термодинамические свойства пластиков в широком диапазоне плотностей и температур // ДАН. 1996. Т. 349, № 3. С. 322–325.
17. Маторин А. С., Павлютенков В. М. Водосодержащие взрывчатые вещества местного приготовления. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 194 с.
18. Цечоева А. Х. Процессы разрушения некоторых полимерных композитных материалов при высокоскоростном нагружении: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 02.00.06. Нальчик, 2013. 17с.
19. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2019 года

Elementary theory of a measuring cable with a resistive method for measuring velocity of detonation of an explosive

Sergey Vasilyevich ILYAKHIN¹,
Ilya Yuryevich MASLOV²,
Pavel Alexandrovich BRAGIN²

¹The Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow, Russia,

²Global Mining Explosive - Russia, Moscow region, Naro-Fominsk, Selyatino village.

Relevance, purpose and methods of research. Currently, reflectometry and resistive methods are widely used to measure the velocity of detonation of explosives in industrial and laboratorially field conditions. The basis of these methods is fixing with a suitable measuring device changes in the length of an intact linear sensor during propagation of a detonation wave over a charge. The sensor is a special cable and is located along the length of the explosive charge when preparing the charge for an explosion. With the resistive method, the device measures and records the value of the electrical resistance of the cable, which decreases as the detonation wave propagates. At the same time, one proceeds from the idea that the cable is destroyed almost instantly, and the detonation products electrically conducting in the zone of chemical reactions of the detonation wave close the conductive elements of the cable. However, almost instantaneous destruction of the measuring cable is possible only with a sufficiently high detonation pressure. At pressures insufficient for the rapid destruction of the cable, the question arises of the possibility of using this method to measure the velocity of a detonation (shock) wave.

Results and conclusions. It is shown that the tool kit used in the resistive method for measuring the detonation velocity of explosives can be used to measure the propagation velocity of relatively weak detonation waves in explosives and shock waves in passive condensed media. Limitations are obtained on the value of the frontal pressure in the front of the detonation wave in the explosive or in the front of the shock wave in passive media and the duration of the shock pulse, during which the specified method allows obtaining correct results.

Keywords: reflectometry method, resistive method, measuring cable, ductile fracture of cable sheaths, pressure at the front of the shock wave, duration of the shock pulse.

REFERENCES

- Kittel D. E., Mares J. O., Son J. F., Son S. F. 2015, Using time-frequency analysis to determine time-resolved detonation velocity with microwave interferometry. Review of scientific instruments. Vol. 86, No 4. P. 1–10. 044705. <https://doi.org/10.1063/1.4916733>
- Rae P. 2019, Determination velocity of detonation using high-resolution time domain reflectometry. Review of Scientific Instruments. Vol. 90, No 8. 085005. <https://doi.org/10.1063/1.5100750>
- Lee Chun-Kwon, Gu-Young Kwon, Lee Yeong, Lee Geon, Bang Su, Shin Yong-June. 2019, Insulation Characteristics and Fault Analysis of HTS Cable via Stepped Frequency Waveform Reflectometry. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. No 3. P. 99.
- Rodriguez G., Gilbertson S. M. 2017, Ultrafast fiber Bragg grating interrogation for sensing in detonation and shock wave experiments. Sensors. Vol. 17, No 1. P. 27.
- Sapronov E. M., Berdov S. P., Belin V. A., Astakhov E. O. 2012, Improving the efficiency of rock blasting based on the study of detonation velocity of emulsion explosives by the reflectometric method. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], No 9, (special issue). P. 46–50. (In Russ.)
- 2013, *Metodika izmereniy skorosti detonatsii vzryvchatykh veshchestv reflektometricheskim metodom s ispol'zovaniyem izmeritelya skorosti detonatsii SpeedVOD* [Methodology for measuring the detonation velocity of explosives using the reflectometric method and the SpeedVOD detonation velocity meter]. Sanitary Engineering Department 01.01.004–2013. Ekaterinburg, 21 p.
- Kutuev V. F., Menshikov P. V., Zharikov S. N. 2016, Analysis of methods of investigation of detonation processes of explosives. *Problemy nedropol'zovaniya* [Subsoil Use Issues]. No 3. P. 78–87. (In Russ.)
- Maslov I. Yu., Pupkov V. V., Kampel F. B. et al. 2003, Determination of the actual detonation velocity and operability of new emulsion explosives with the aim of choosing a rational loading density during the explosion of iron ores. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], P. 56–60. (In Russ.)
- Maslov I. Yu., Pupkov V. V., Kampel F. P. et al. 2006, Method for continuous measurement of the detonation velocity of charges of industrial explosives. *Vzryvnoye delo* [Explosion technology], P. 101–113. (In Russ.)
- Dobrynin I. A. 2007, Methodology for measuring the velocity of detonation of explosives in borehole charges using modern sensors. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], No 8, P. 27–33. (In Russ.)
- Kotyashov A. A., Matorin A. S., Menshikov P. V. 2009, *Opredeleeniye kharakteristik emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv metodom proizvodstvennogo eksperimenta* [Characterization of emulsion explosives by the production experiment method]. Technological equipment for the mining and oil and gas industries. Readings in memory of V. R. Kubachek: book of reports. VII International Scientific conference Yekaterinburg. P. 58–63.
- 2011, *Metodika izmereniy skorosti detonatsii vzryvchatykh veshchestv reostatnym metodom s ispol'zovaniyem izmeritelya skorosti detonatsii VOD Mate STO 01.01.004-2011* [Method of measuring the detonation velocity of explosives by the rheostatic method using the VOD Mate detonation velocity meter SED 01.01.004-2011]. Ekaterinburg, 17 p.
- Ershov A. P., Satonkina N. P., Ivanov G. M. et al. 2006, Reaction zones and conductive zones in dense explosives. Proc. of 13th International Detonation Symposium 351-07-01. Norfolk, VA. Office of Naval Research. Arlington, VA. P. 79–88.
- Satonkina N. P., Prueel E. R., Ershov A. P. et al. 2015, Evolution of electrical conductivity of emulsion explosives during their detonation transformation. *Fizika gorenija i vzryva* [Combustion, Explosion and Shock Waves], Vol. 51, No 3. P. 91–97. (In Russ.)
- Kunyzhev B. I., Tsechoeva A. H., Kushkhatokov S. L., Kadykoeva M. Kh. 2015, Shock adiabat and temperature estimation of shock-compressed polyethylene. *Nauchnyye izvestiya* [Scientific News], No 1, P. 89–93. (In Russ.)
- Khishchenko K. V., Lomonosov I. V., Fortov V. E., Shlensky O. F. 1996, Thermodynamic properties of plastics in a wide range of densities and temperatures. *Doklady akademii nauk* [Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Sections], vol. 349, No 3. P. 322–325. (In Russ.)
- Matorin A. S., Pavlyutenkov V. M. 2004, *Vodosoderzhashchiye vzryvchatyye veshchestva mestnogo prigotovleniya* [Water-based explosives of local manufacture], Ekaterinburg, 194 p.
- Tsechoeva A. Kh. 2013, *Protsessy razrusheniya nekotorykh polimernykh kompozitnykh materialov pri vysokoskorostnom nagruzenii* [Destruction processes of some polymer composite materials under high speed loading], PhD thesis, 02.00.06. Nalchik, 17p.
- Loitsyansky L. G. 1987, *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of fluid and gas], Moscow, 840 p.

The article was received on November 14, 2019